Op-amp als gelijkrichter

U gebruikt uiteraard geen op-amp als u een gelijkrichter nodig hebt in een voeding. Waar op-amp's wél van pas komen is bij het gelijkrichten van kleine signaalspanningen, bijvoorbeeld in VU-meters en automatische volume regelingen AVR's.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 30-06-2023

Inleidende begrippen

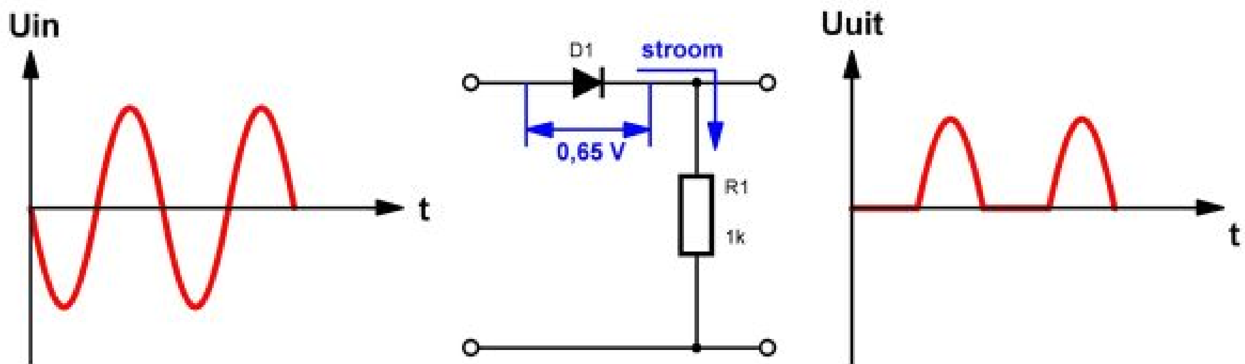
Wat betekent gelijkrichten?
In de meest algemene betekenis van het woord betekent gelijkrichten '*het omzetten van een wisselspanning in een gelijkspanning*'. De meest bekende toepassing van gelijkrichting is uiteraard de schakeling met twee of vier diodes die in iedere lineaire voeding zit en die de secundaire wisselspanning van een trafo omzet in een gelijkspanning waarmee u een elektronische schakeling kunt voeden.
Over dit soort toepassing gaat dit artikel echter niet. Wij zullen hier actieve schakelingen met een of twee op-amp's bespreken waarmee u kleine signaalspanningen kunt omzetten in gelijkspanningen.

Waarom signaalspanningen gelijkrichten?
Als u de grootte van een signaalspanning, bijvoorbeeld de uitgangsspanning van een audioversterker, wilt meten dan ontkomt u er niet aan dit signaal eerst gelijk te richten. Er bestaan namelijk maar weinig principes waarmee u de grootte van een wisselspanning kunt bepalen zonder deze eerst gelijk te richten. Deze principes zijn bovendien veel complexer dan de actieve gelijkrichters met een of twee op-amp's die u vrij eenvoudig zélf kunt ontwerpen.
Behalve voor het meten van de grootte van zo'n signaal zijn actieve gelijkrichters ook noodzakelijk in tal van andere schakelingen. Als u bijvoorbeeld een automatische volumeregeling wilt ontwerpen moet u het signaal eerst gelijkrichten en deze gelijkgerichte spanning gebruiken om deze AVR aan te sturen.

Soorten van actieve gelijkrichters
Er bestaan verschillende soorten van dergelijke gelijkrichters, die allemaal hun specifieke eigenschappen en dus ook toepassingen hebben.
In dit artikel komen aan de orde:
- De halve periode gelijkrichter.
- De volle periode gelijkrichter.
- De precisie gelijkrichter.
- Het anti-rimpel filter.
- De top-detector.
- De precisie top-detector.

De halve periode gelijkrichter

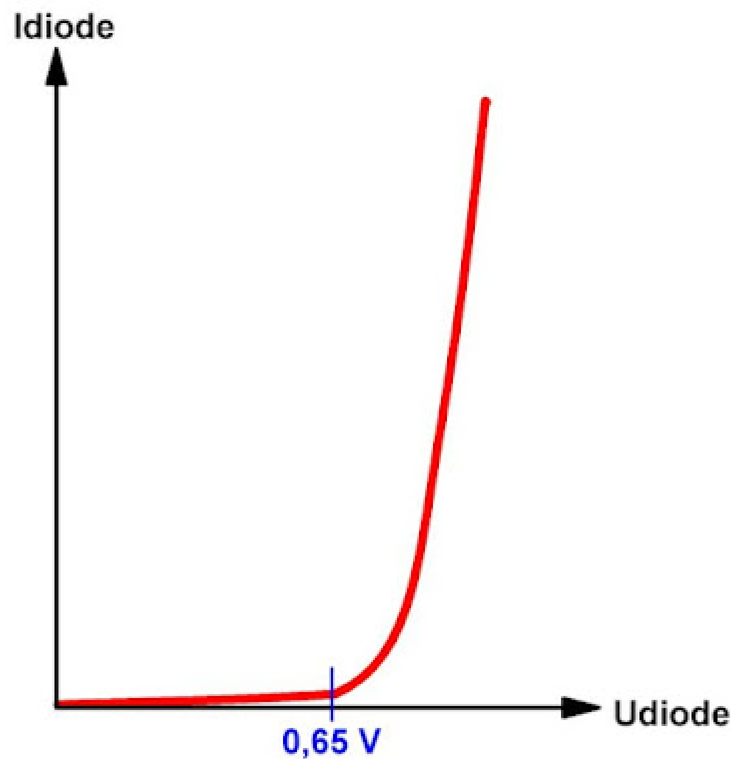
Een silicium diode als gelijkrichter
In principe kunt u een eenvoudige gelijkrichter samenstellen volgens het schema van de onderstaande figuur. De diode D1 zal gaan geleiden als de anode positiever is dan de kathode en gaan sperren als de anode negatiever is dan de kathode. Als u op de ingang van de schakeling een wisselspanning Uin zet, dan zal de diode alleen geleiden bij de positieve halve perioden van het signaal.



Een silicium diode als meest eenvoudige halve periode gelijkrichter.
(© 2023 Jos Verstraten)

Het gevolg is dat er dan een stroom door de keten vloeit. Deze stroom wekt over de weerstand R1 een spanning U_{uit} op, die gelijkvormig is aan het positieve verloop van het ingangssignaal. Als de ingangsspanning negatief wordt, dan spert de diode D1 en zal er geen stroom door de keten vloeien. Over de weerstand R1 valt geen spanning, de uitgangsspanning U_{uit} is 0 V.

De niet ideale diode
Deze eenvoudige schakeling heeft een aantal nadelen. Een diode is namelijk alles behalve een ideale schakelaar. De stroom/spanning-karakteristiek van een silicium diode is getekend in de onderstaande figuur. Uit deze karakteristiek kunt u afleiden dat over een geleidende diode een spanning ontstaat die afhankelijk is van de stroom door de diode. Deze spanning staat tussen de in- en de uitgangsspanning van de gelijkrichter, met als gevolg dat de uitgangsspanning van de schakeling niet gelijk is aan de ingangsspanning, maar altijd kleiner. De gemiddelde spanning over een geleidende Si-diode bedraagt ongeveer 0,65 V. De uitgangsspanning zal altijd 0,65 V kleiner zijn dan de ingangsspanning.



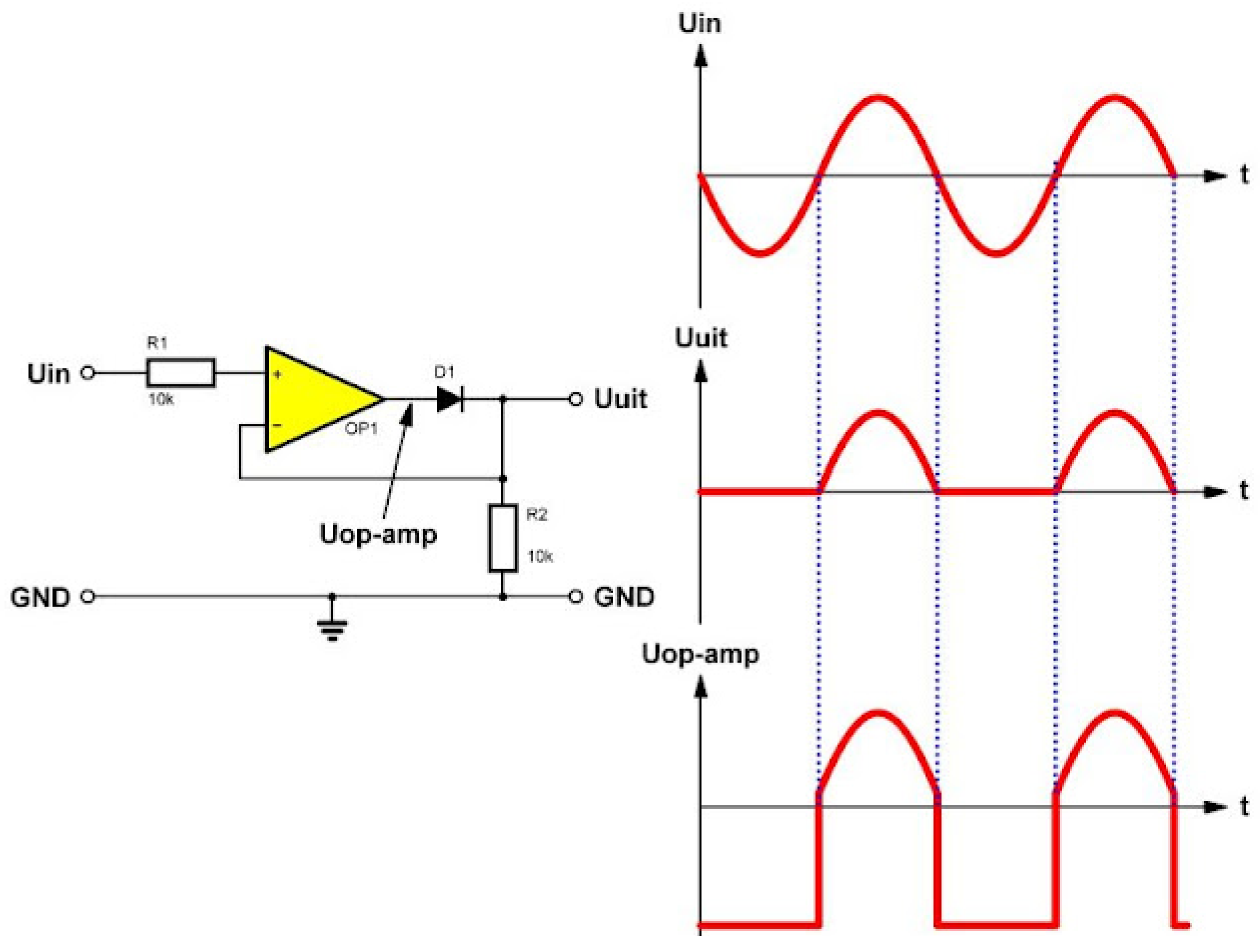
De stroom/spanning-karakteristiek van een silicium diode.
(© 2023 Jos Verstraten)

Niet lineaire karakteristiek
Bovendien is dat verband tussen spanning en stroom alles behalve lineair, hetgeen er op wijst dat de inwendige weerstand van een diode niet constant is. Als de spanning over de diode laag is, dan zal de diode een vrij hoge inwendige weerstand hebben. Deze weerstand staat in serie met de weerstand R1. Het gevolg is dat het grootste gedeelte van de kleine ingangsspanning over de diode valt en er nauwelijks een signaal over de weerstand R1 ontstaat.
Vandaar dat deze schakeling absoluut ongeschikt is om wisselspanningssignalen die kleiner zijn dan 1 V gelijk te richten. Er verschijnt nauwelijks een spanning op de uitgang en het verband tussen deze spanning en de ingangsspanning is alles behalve lineair. Eerst bij ingangsspanningen van meer dan 1 V is de inwendige weerstand van de diode zo laag geworden dat zij verwaarloosbaar is ten opzichte van de waarde van de weerstand R1. Er bestaat dan wel een lineair verband tussen de in- en de uitgangsspanning, maar nog steeds met een spanningsverschil van ongeveer 0,65 V. Met deze geleidingsspanning die over de diode staat moet u altijd rekening houden!

Conclusie
Het diode/weerstand-netwerkje is uitstekend bruikbaar voor het gelijkrichten van grote wisselspanningen, waarbij de nauwkeurigheid geen rol speelt. Komt het er op aan een klein wisselspanningssignaal gelijk te richten voor meetdoeleinden, dan is deze schakeling volledig onbruikbaar.

De actieve op-amp oplossing
Met behulp van een operationele versterker en een extra weerstand kunt u de diode/weerstand-schakeling omvormen tot een zeer nauwkeurige halve periode gelijkrichter. Het basisschema van de schakeling is getekend in de onderstaande figuur.
De gelijk te richten wisselspanning U_{in} gaat via de weerstand R1 naar de niet-inverterende ingang van de op-amp OP1. Tussen de uitgang van de op-amp en de uitgang van de schakeling is een silicium diode D1 opgenomen. Deze wordt afgesloten met een weerstand R2 naar de massa. Het signaal over de weerstand wordt teruggekoppeld naar de inverterende ingang van de op-amp. De operationele versterker zal er onder alle

omstandigheden naar streven het spanningsverschil tussen beide ingangen nul te maken.

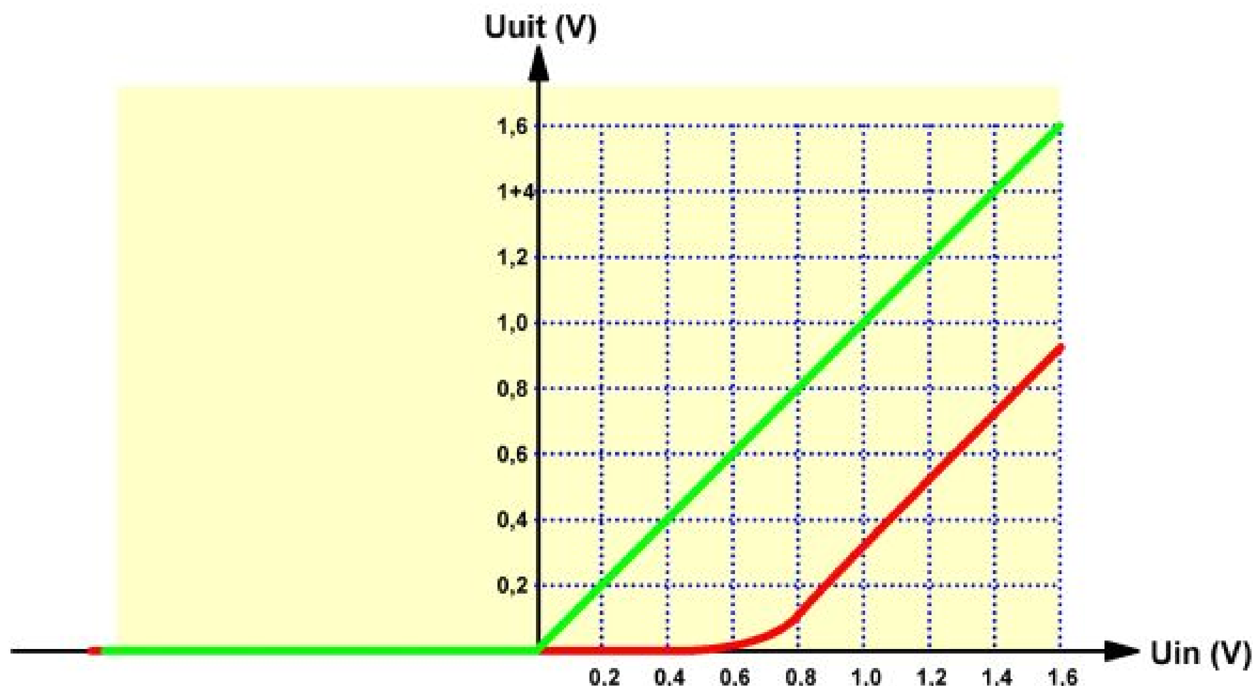


Het basisschema van de halve periode gelijkrichter met op-amp. (© 2023 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling
De werking van de schakeling wordt toegelicht aan de hand van de grafieken rechts in de figuur. Stel dat aan de ingang een spanning van +0,1 V wordt aangelegd. Deze spanning komt via de weerstand R1 terecht op de niet-inverterende ingang van de op-amp. De schakeling zal er voor zorgen dat ook de spanning op de inverterende ingang gelijk wordt aan +0,1 V. Dat kan alleen als over de weerstand R2 dezelfde spanning ontstaat. Tussen de uitgang van de op-amp en deze weerstand staat echter de diode D1 geschakeld. Wil over de weerstand R2 een spanning van +0,1 V ontstaan, dan zal de diode in geleiding gestuurd moeten worden. De uitgang van de op-amp stelt zich in op een spanning van ongeveer +0,75 V. De diode gaat geleiden en de stroom die door de geleidende diode vloeit wekt over de weerstand R2 een spanning van +0,1 V op. De schakeling zorgt er voor dat, als aan de ingang een positieve spanning wordt gelegd, dezelfde spanning wordt terug gevonden op de uitgang van de schakeling.
Stel nu dat aan de ingang een negatieve spanning wordt gelegd. Ook deze spanning komt onverzwakt op de niet-inverterende ingang te staan. De schakeling zal proberen ook nu de inverterende ingang op deze spanning in te stellen. De uitgang van de op-amp wordt dus negatief gestuurd. Maar nu gaat de diode D1 sperren. Het gevolg is dat er geen stroom wordt doorgelaten en dat er over de weerstand R2 geen spanning ontstaat. Om toch te proberen aan de spanningsgelijkheid tussen beide ingangen te voldoen stuurt de op-amp zijn uitgang maximaal negatief. Natuurlijk zonder resultaat, want de diode blijft sperren. Bij negatieve spanningen aan de ingang wordt de uitgang van de op-amp maximaal negatief uitgestuurd, maar blijft de uitgangsspanning van de schakeling op 0 V staan.

Eigenschappen van de schakeling
Deze schakeling is een ideale halve periode gelijkrichter. Zelfs een wisselspanningssignaaltje van 10 mV wordt perfect gelijkgericht! Als u de transfer karakteristiek van deze halve periode gelijkrichter zou opstellen ontstaat de grafiek van onderstaande figuur. In deze grafiek wordt

de niet-ideale karakteristiek van een Si-diode (rode lijn) vergeleken met deze van de schakeling (groene lijn). In het linker deel van de grafiek (dat deel waar zowel de in- als de uitgangsspanningen negatief zijn) ontstaat een horizontale rechte lijn. In het rechter deel van de grafiek (dat deel waar zowel in- als uitgangsspanningen positief zijn) ontstaat een rechte lijn onder een hoek van 45°. Een ingangsspanning van +0,123 V wekt een uitgangsspanning op van +0,123 V! Dit uiteraard in de veronderstelling dat de offset van de operationele versterker geen roet in het eten gooit. Maar het is, zoals bekend, vrij eenvoudig om de offsetspanning van een operationele versterker extern te compenseren.



De ideale transfer karakteristiek van de op-amp gelijkrichter (groen).
(© 2023 Jos Verstraten)

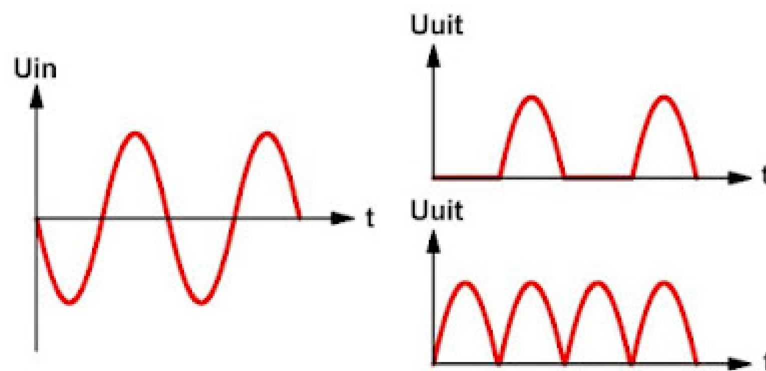
Deze halve periode gelijkrichter heeft als groot voordeel dat de schakeling zeer eenvoudig is. Als u de gelijkgerichte spanning wilt meten, dan volstaat het de schakeling af te sluiten met een zeer eenvoudig afvlakfilter. Zo'n filter bestaat uit een weerstand en een condensator. De condensator wordt via de weerstand opgeladen tot de topwaarde van de positieve halve perioden die op de uitgang van de gelijkrichter ontstaan. Legt u aan de ingang van de schakeling een sinusoidale wisselspanning met een amplitude van 0,3 V, dan zal de condensator van het afvlakfilter opladen tot +0,3 V. Deze gelijkspanning kunt u met een digitale meter of een LED-schaal nauwkeurig meten.

Nadeel van de schakeling
De schakeling heeft echter ook een groot nadeel. Dat is een rechtstreeks gevolg van het feit dat de uitgang van de op-amp vastloopt tegen de negatieve voedingsspanning als u aan de ingang een negatieve spanning aanlegt. Als nadien deze spanning weer positief wordt moet de uitgang van de op-amp opeens van maximaal negatief naar positief omschakelen. Nu hebben operationele versterkers maar een beperkte snelheid. Het omschakelen van een dergelijke grote negatieve spanning naar een positieve spanning duurt een bepaalde tijd. Daardoor zal het frequentiebereik van deze schakeling tamelijk beperkt zijn. Met een normale op-amp zoals een 741 kunt u deze schakeling slechts gebruiken tot enkele kHz.

De volle periode gelijkrichter

Inleiding

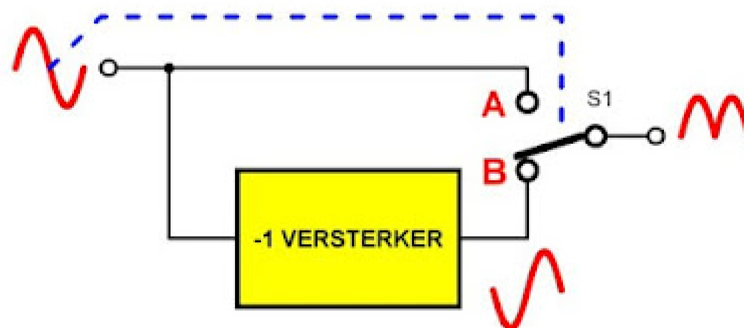
De besproken halve periode gelijkrichter laat de positieve halve perioden van een wisselspanningssignaal door en spert de negatieve. Dat is een niet erg economische manier van werken en vandaar dat men schakelingen heeft ontwikkeld die zowel de positieve als de negatieve halve perioden in de gelijkrichting betrekken. Vaak wordt dit soort schakelingen '*dubbelzijdige gelijkrichters*' genoemd. Een verkeerde omschrijving, omdat het begrip '*zijde*' iets heel anders omschrijft dan een van de helften van een wisselspanningsperiode. De enige juiste naam van een dergelijke gelijkrichter is '*volle periode gelijkrichter*'! Het verschil tussen het uitgangssignaal van een halve periode gelijkrichter en een volle periode gelijkrichter is geschetst in de onderstaande figuur. De negatieve halve perioden van het ingangssignaal worden als het ware omgeklapt rond de tijd-as. De negatieve spanningen worden dus omgezet in even grote positieve spanningen.



Het verschil tussen halve en volle periode gelijkrichting.
(© 2023 Jos Verstraten)

Het principe van volle periode gelijkrichting

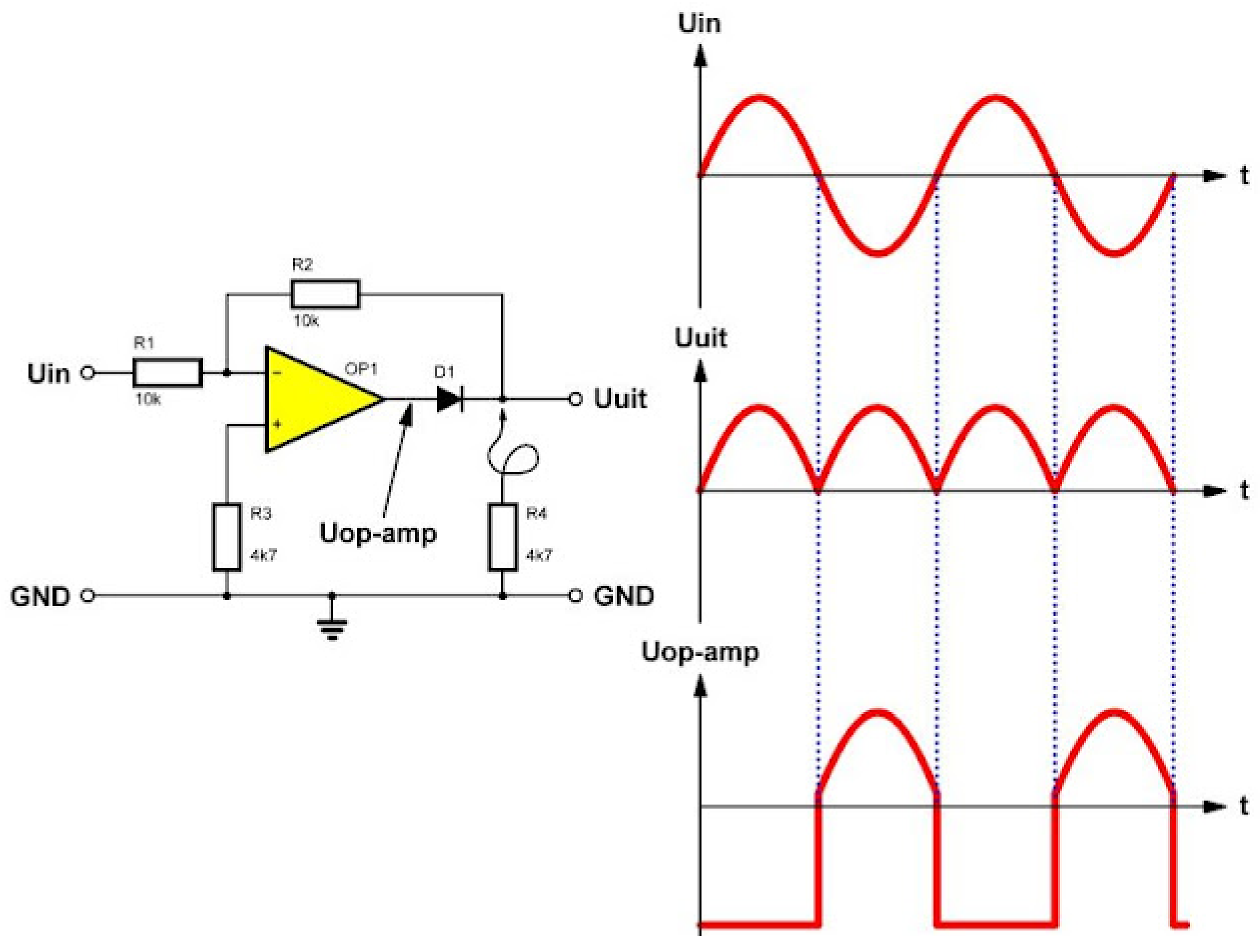
Het principe van de schakeling is getekend in de onderstaande figuur. De ingangsspanning gaat naar één contact van een elektronische omschakelaar S1. Maar daarnaast gaat het ingangssignaal ook naar een -1 versterker, dus een inverter. Het uitgangssignaal van deze trap gaat naar het tweede contact van de elektronische omschakelaar. Als de ingangsspanning positief is staat de schakelaar in stand A. Het signaal gaat rechtstreeks naar de uitgang. Wordt de ingangsspanning negatief, dan schakelt de schakelaar om. Het uitgangssignaal van de inverter gaat nu naar de uitgang. Het gevolg is dat de uitgangsspanning steeds positief is. De elektronische omschakelaar schakelt dus om bij de nuldoorgang van het ingangssignaal.



Principe van volle periode gelijkrichting. (© 2023 Jos Verstraten)

De schakeling met een op-amp

Het praktische schema van een volle periode gelijkrichter met een operationele versterker is getekend in de onderstaande figuur. U herkent in grote lijnen het basisschema van de inverterende versterker. De inverterende ingang gaat via een weerstand R1 naar de ingangsspanning Uin en via een even grote weerstand R2 naar de uitgang. De niet-inverterende ingang gaat via een weerstand R3 naar de massa. Het enige verschil is dat er nu een diode D1 tussen de uitgang van de op-amp en de uitgang van de schakeling staat.



Volle periode gelijkrichting met een op-amp. (© 2023 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling
De werking van de schakeling wordt toegelicht aan de hand van de grafieken rechts in de figuur. Stel dat aan de ingang van de schakeling een positieve spanning wordt aangeboden. Deze spanning zal via weerstand R1 op de inverterende ingang van de op-amp terecht komen. Deze ingang heeft echter een zeer hoge weerstand, zodat de spanning niet verzwakt wordt. De inverterende ingang wordt nu positiever dan de niet-inverterende ingang. Het gevolg is dat de uitgang van de op-amp negatief wordt gestuurd. Deze negatieve spanning komt op de anode van D1 terecht. Het gevolg is dat de diode gaat sperren. Het lijkt dus net alsof de uitgang van de op-amp wordt losgekoppeld van de rest van de schakeling. De ingangsspanning, die via weerstand R1 op de inverterende ingang was gekomen, gaat nu verder via weerstand R2 naar de uitgang van de schakeling.
Stel nu dat er op de ingang een negatieve spanning wordt gelegd. Ook deze spanning komt via weerstand R1 op de inverterende ingang. Deze ingang wordt negatiever dan de niet-inverterende ingang, het gevolg is dat de uitgang van de op-amp positief wordt uitgestuurd. De diode D1 gaat nu geleiden, de uitgang van de schakeling wordt positief. Deze positieve spanning wordt via de weerstand R2 teruggekoppeld naar de inverterende ingang. De schakeling werkt nu als een normale inverterende versterker. Doordat R1 en R2 even groot zijn zal de schakeling ervoor zorgen dat de spanning op de uitgang even groot wordt als de spanning op de ingang, maar uiteraard met tegengestelde polariteit.

Nadelen van de schakeling
Ook deze schakeling heeft als nadeel dat de operationele versterker gedurende de helft van de periode volledig negatief wordt uitgestuurd, met als gevolg dat het frequentiebereik zeer klein is. Ook nu moet immers de uitgangsspanning van de op-amp bij het nulpunt van de ingangsspanning opeens omschakelen van een grote negatieve naar een kleine positieve spanning. Dit duurt tamelijk lang.
Maar een tweede nadeel is dat de werking van de schakeling wordt beïnvloed door de belasting. Stel dat de schakeling wordt belast door een weerstand R4. Deze weerstand stelt de ingangsweerstand voor van de schakeling die op de volle periode gelijkrichter is

aangesloten. Het gevolg is dat, bij een positieve spanning aan de ingang, er een stroom door de drie weerstanden R1, R2 en R4 gaat vloeien. Een deel van de ingangsspanning zal over de weerstanden R1 en R2 blijft staan en er zal dus een spanningsverschil ontstaat tussen de ingang en de uitgang. De nauwkeurigheid van de gelijkrichting wordt dus beïnvloed door de grootte van de belastingsweerstand. Datzelfde geldt overigens niet als de ingangsspanning negatief is! Dan, immers, zal de operationele versterker er via de terugkoppeling R2 voor zorgen dat de uitgangsspanning gelijk blijft aan de geïnverteerde waarde van de ingangsspanning.

Conclusie
Wilt u deze schakeling gebruiken om een wisselspanning zeer nauwkeurig gelijk te richten, dan moet u de schakeling afsluiten met een zeer hoge weerstand. In de praktijk zit er niets anders op dan achter de schakeling een spanningsbuffer te schakelen. Een dergelijke schakeling heeft immers een ingangsweerstand die onmeetbaar hoog is.

De precisie gelijkrichter

Inleiding
Als u de besproken schakeling in de praktijk wilt toepassen moet u er steeds een tweede operationele versterker, geschakeld als spanningsbuffer, achter schakelen. Men heeft een alternatieve schakeling ontwikkeld, die ook gebruik maakt van twee operationele versterkers en die vrij is van alle genoemde nadelen. Deze schakeling werkt zo nauwkeurig dat zij vaak gebruikt wordt als gelijkrichter in digitale universeelmeters. Vandaar dat men deze schakeling '*de precisie gelijkrichter*' noemt.

Het praktische schema
Het praktische schema van de precisie gelijkrichter is getekend in de onderstaande figuur. Rond operationele versterker OP1 kunt u voor een deel het vorige schema herkennen. Maar om er voor te zorgen dat de schakeling nooit in open lus werkt, wordt een extra weerstand met diode tussen de inverterende ingang en de uitgang geschakeld. Deze kring R4/D2 zorgt ervoor dat ook als D1 gaat sperren er toch een weerstand tussen de ingang en de uitgang geschakeld is, zodat de versterking klein blijft en de uitgangsspanning van de op-amp niet vast loopt tegen de negatieve voedingsspanning.
Het tweede deel van de schakeling rond OP2 is een inverterende mengversterker. Deze zal de signalen op de punten U_{in} en U_3 bij elkaar optellen. Op deze manier wordt voorkomen dat de belasting een negatieve invloed kan hebben op de nauwkeurigheid van de schakeling. Voorwaarde is wel dat de diverse weerstandswaarden in de schakeling heel precies aan elkaar gelijk zijn. Voor de weerstanden R1, R3, R5, R6, R7 en R9 moet u minstens ±1 % weerstanden gebruiken. Gelukkig hebben al deze onderdelen een identieke waarde, zodat u deze kunt vervangen door een weerstandsnetwerk waar zes identieke weerstanden in verwerkt zijn.

Het praktische schema van de zeer nauwkeurige gelijkrichter. (© 2023 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling bij plus aan de ingang
Stel dat u aan de ingang een positieve spanning aanlegt. Deze spanning zal, dank zij de werking van OP1, even groot maar negatief terug te vinden zijn op het punt U_3. De positieve ingangsspanning zal een bepaalde stroom I door de weerstand R5 sturen. Door de parallel schakeling van de weerstanden R6 en R7 loopt een twee maal zo grote stroom 2•I in de tegengestelde richting. De spanningen op de punten U_{in} en U_3 zijn immers even groot, maar tegengesteld en de vervangingswaarde van R6 parallel aan R7 is de helft van de waarde van R5.
Het gevolg is dat er een stroom I via weerstand R9 naar de inverterende ingang van OP2 moet aangevoerd worden. Alleen dan vloeien er 2•I naar dat punt en vloeien er ook weer 2•I vandaan!
Uit de richting waarin deze stroom door de weerstand R9 vloeit kunt u afleiden dat de uitgang van OP2 positief wordt. Maar omdat de weerstanden R5 en R9 even groot zijn, moeten ook de spanningsvallen over beide onderdelen even groot zijn. Over R5 staat de ingangsspanning, over R9 staat dus ook een spanning die gelijk is aan de ingangsspanning. Omdat het knooppunt van beide weerstanden aan de massa ligt (het virtuele nulpunt van de inverterende ingang) zal de uitgangsspanning van de schakeling exact gelijk zijn aan de ingangsspanning. De nauwkeurigheid van deze gelijkheid wordt alleen bepaald door de mate waarin de weerstanden aan elkaar gelijk zijn!
Als aan de ingang een positieve spanning wordt gelegd, dan verschijnt dezelfde spanning op de uitgang van de gelijkrichter.

De werking van de schakeling bij min aan de ingang
Stel vervolgens dat er een negatieve spanning op de ingang wordt aangesloten. Op punt U_3 staat nu geen spanning, vanwege de werking van de halve periode gelijkrichter rond OP1. De diode D1 spert en de inverterende ingang van OP1 staat op 0 V. Er vloeit bijgevolg geen stroom door de weerstanden R6 en R7. Wel vloeit er een stroom I’ door de weerstand R5. Deze vloeit uiteraard in de tegengestelde richting van I naar de negatieve ingangsspanning

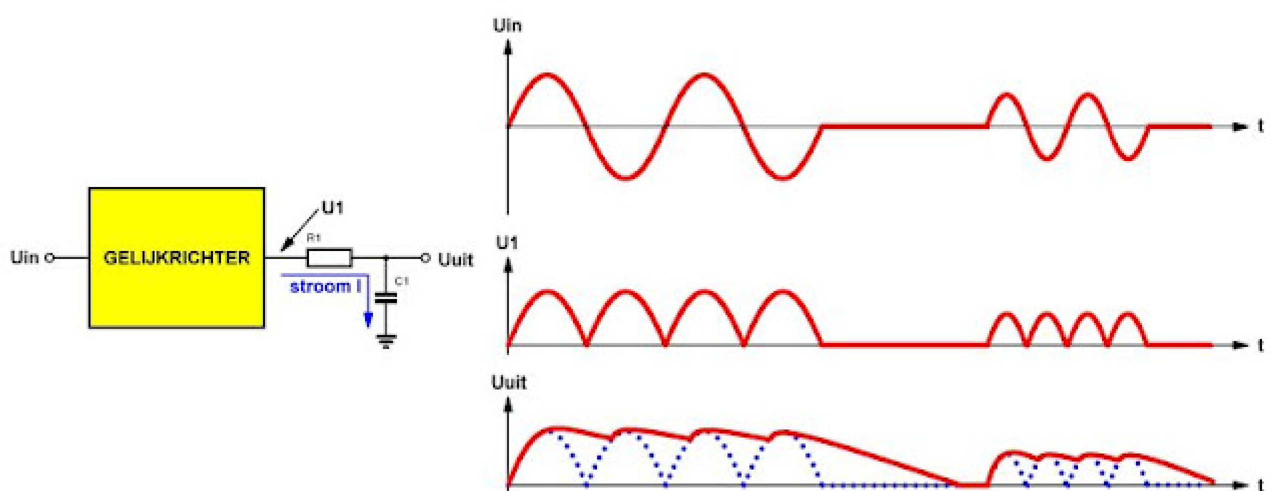
toe. Deze stroom moet ergens vandaan komen. Dat kan alleen vanuit R9 en u stelt vast dat door deze weerstand nu een stroom vloeit, die wél in dezelfde richting vloeit als eerst bij een positieve ingangsspanning. De uitgangsspanning wordt nu dus weer positief en wel met een grootte die precies gelijk is aan de grootte van de ingangsspanning.
Een negatieve ingangsspanning wordt omgezet in een positieve spanning met dezelfde absolute grootte als de ingangsspanning.

Conclusie
De schakeling werkt als ideale volle periode gelijkrichter. Nog even de voordelen op een rijtje:

- De nauwkeurigheid van de gelijkrichting is alleen afhankelijk van de offset van de operationele versterkers en van de nauwkeurigheid van zes weerstanden. U kunt de eerste parameter gemakkelijk compenseren, de twee grootheid heeft u zélf in de hand. U kunt ±0,1 % weerstanden inzetten die als netwerkje te koop zijn.
- Het frequentiebereik is groot, omdat de operationele versterkers steeds in gesloten lus werken en er op de uitgangen van de op-amp's geen grote spanningssprongen ontstaan. De slew-rate van de schakelingen speelt dus geen grote rol.
- De gelijkgerichte uitgangsspanning wordt afgenomen van de uitgang van OP2. De weerstand van dat punt is zeer laag met als gevolg dat de belasting van de schakeling geen enkele rol speelt.
- Door de zeer lage uitgangsweerstand kunt u het afvlakfilter dat meestal na de gelijkrichter noodzakelijk is uitvoeren met een kleine tijdconstante. Daardoor zal de afgevlakte spanning zeer snel de nieuwe waarde van de ingangsspanning overnemen. Dat is een belangrijke eigenschap als u de schakeling gebruikt in een VU-meter. Het is namelijk de bedoeling dat de uitlezing zeer snel de waarde van de wisselspanning aan de ingang aangeeft en er geen seconden over doet om naar die waarde te streven.

Het anti-rimpel filter

Inleiding
De in de vorige paragrafen beschreven gelijkrichters leveren een pulserende gelijkspanning af. In de meeste gevallen is dat signaal niet zonder meer bruikbaar. Het is immers de bedoeling dat de gelijkgerichte spanning wordt gemeten en dan moet u de beschikking hebben over een zo glad mogelijk verlopende spanning. De standaard oplossing daarvoor is de gelijkrichter afsluiten met een passief RC-filter, zoals geschetst in de onderstaande figuur.

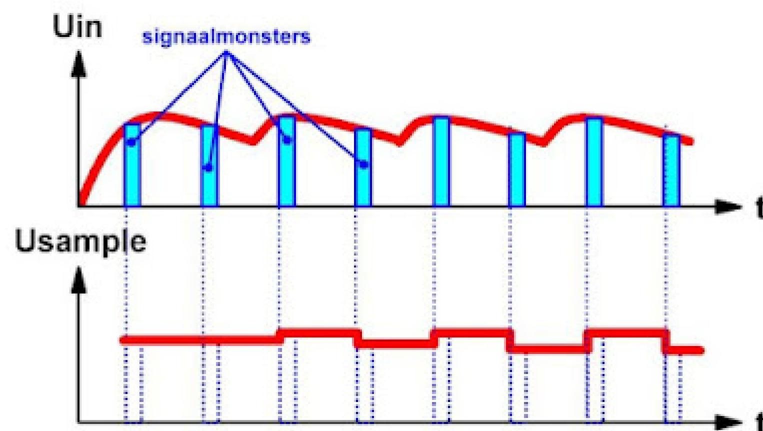


Het afvlakken van de pulserende gelijkspanning. (© 2023 Jos Verstraten)

De werking wordt duidelijk bij bestudering van de rechter grafieken. Als de uitgangsspanning U_1 van de gelijkrichter positief wordt, zal er een stroom I door de weerstand R1 gaan vloeien.

Deze stroom laadt de condensator C1 op. Dat laden gaat snel, zodat de spanning over de condensator vrij nauwkeurig het spanningsverloop van de uitgangsspanning van de condensator volgt. Als de halve sinus zijn topwaarde heeft bereikt is de condensator ook tot deze waarde opgeladen. Vervolgens gaat de spanning op de uitgang van de gelijkrichter weer dalen. De condensator wordt nu niet meer opgeladen, maar gaat via de weerstand R1 ontladen. Dat ontladen gaat echter trager, een gevolg van de niet identieke laad- en ontlaadkarakteristieken van een condensator. Het gevolg is dat de condensatorspanning achter ijlt op de uitgangsspanning en de kloof tussen de halve sinussen dus min of meer gedicht wordt.
Het resultaat is een min of meer gladgestreken signaal, waarvan de gemiddelde waarde rechtstreeks afhankelijk is van de topwaarde van het signaal dat uit de gelijkrichter komt. Het verschil tussen deze gemiddelde waarde en de topwaarde kan bij het ijken van de meter die de spanning meet afgeregeld worden.

Nadelen van het passief RC-filter
Het passieve RC-afvlakfilter heeft als nadeel dat er toch een rimpel blijft bestaan op het gefilterde signaal. Dat kan een probleem zijn als u de gelijkrichter met passief RC-filter gebruikt in combinatie met een digitale meter. Wat er dan kan gebeuren is geschetst in de onderstaande figuur. Een analoog naar digitaal converter, het hart van iedere digitale voltmeter, neemt regelmatig gedurende een zeer kleine tijd een monstertje van het te meten ingangssignaal. Al deze monsters worden omgezet in een gelijkspanning U_{sample}. Deze spanning wordt verwerkt tot een digitale code, die nadien op de uitlezing van de digitale meter wordt gezet. De kans is erg groot dat de uitlezing van de meter niet stabiel is, maar van meting tot meting een spreiding van enige tientallen mV vertoont. Een verschijnsel dat bekend staat onder de naam '*jitter*'.

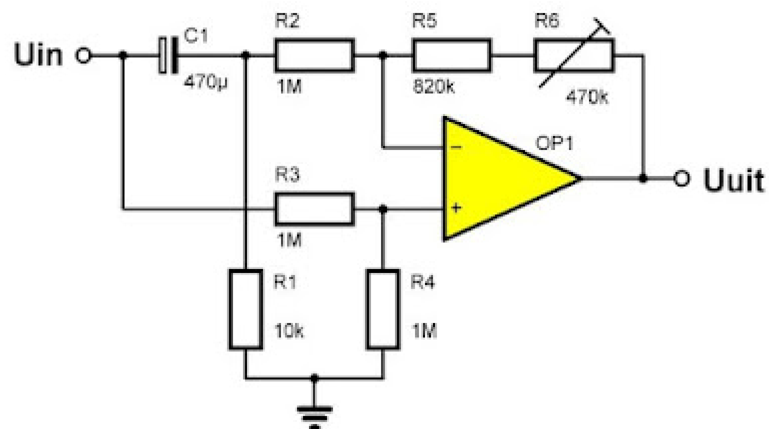


Door de rimpel kan er spreiding op de meting ontstaan.
(© 2023 Jos Verstraten)

Dat verschijnsel valt gemakkelijk ter verklaren aan de hand van de grafiek. Het ene signaalmonster wordt genomen op het moment dat de uitgangsspanning van het filter maximaal is. Een ander monster, echter, wordt genomen op het moment dat deze spanning minimaal is. Tussen beide metingen zit een verschil gelijk aan de grootte van de rimpelspanning op de uitgang van het afvlakfilter. De spanning U_{sample} is dus niet stabiel, maar wijkt van sample tot sample iets af van een gemiddelde waarde. Bij het omzetten van deze spanning in digitale waarden zal er dus een spreiding ontstaan op de uitlezing, de reeds genoemde jitter.
Nu kunt u proberen de rimpel zo klein mogelijk te maken door het verhogen van de waarden van de componenten van het RC-filtertje. De afvlakking van het gelijkgerichte signaal wordt dan inderdaad beter, maar het duurt ook veel langer alvorens de condensator zich heeft aangepast aan een nieuwe waarde van de wisselspanning aan de ingang van de gelijkrichter.

Een actief anti-rimpel filter

Door middel van een eenvoudige schakeling met één operationele versterker kunt u een ideaal anti-rimpel filter maken, dat niet geplaagd wordt door enige traagheid van betekenis. Het praktische schema is getekend in de onderstaande figuur.
In feite is deze schakeling niets anders dan een verschilversterker. Vier even grote weerstanden R2, R3, R4 en R5+R6 zijn op de voor verschilversterkers specifieke manier rond de operationele versterker geschakeld. Beide ingangen van de verschilversterker worden nu echter gestuurd uit één ingangsspanning, de spanning die ontstaat over de condensator van het afvlakfilter. Deze spanning gaat via R3 rechtstreeks naar een ingang van de verschilversterker. De tweede ingang wordt echter uit het signaal gestuurd via tussenschakeling van een CR-filter C1/R1. Dit filter zal alleen de rimpel doorlaten.
U moet aan de componenten van dit filter de volgende eisen stellen. De weerstand R1 moet klein zijn ten opzichte van de weerstanden van de verschilversterker. Men adviseert een verhouding van 1/100. In het getekende voorbeeld is de verschilversterker uitgerust met weerstanden van 1 MΩ, vandaar dat R1 gelijk moet zijn aan 10 kΩ. Wil het CR-netwerk de rimpelspanning onverzwakt doorkoppelen naar de tweede ingang van de verschilversterker, dan is het noodzakelijk dat de condensator erg groot is. Vandaar dat een elco van 470 µF wordt ingeschakeld.



De praktische schakeling van het anti-rimpel filter.
(© 2023 Jos Verstraten)

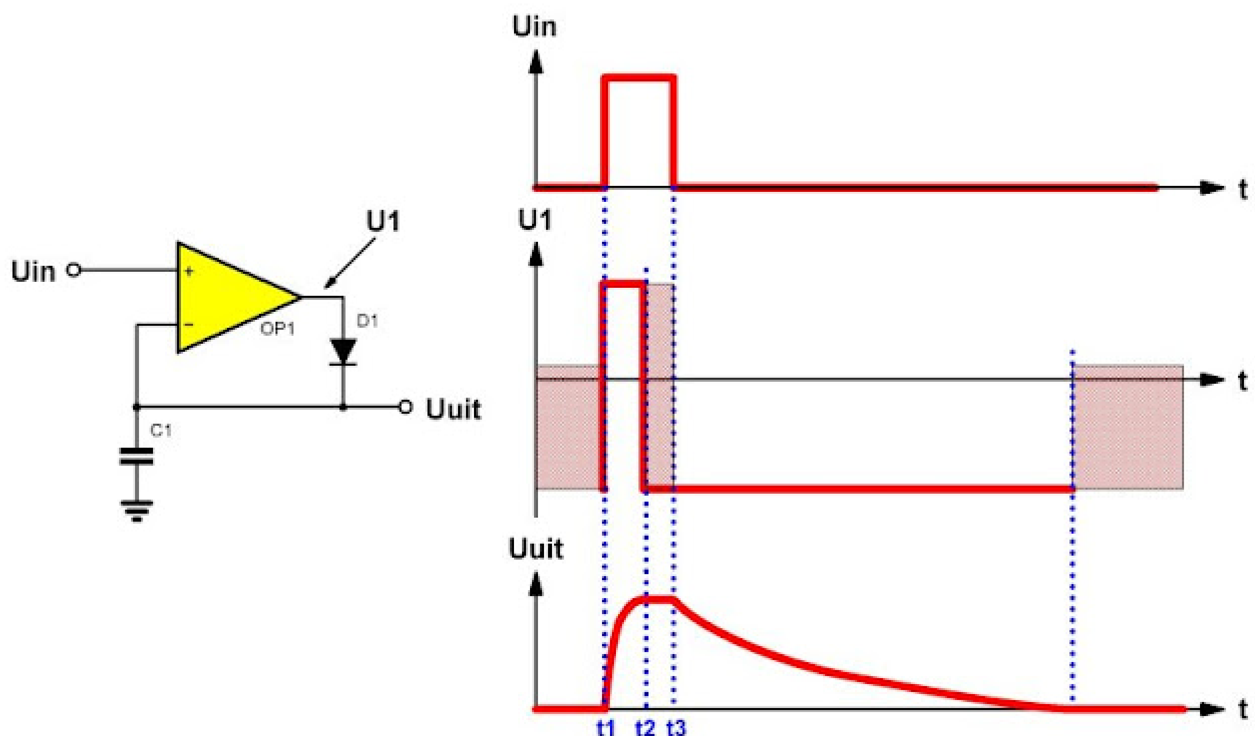
De werking van de schakeling
De ingangsspanning U_{in} is samengesteld uit twee componenten. Op de eerste plaats een gelijkspanning U_{dc}, op de tweede plaats een rimpelspanning U_{ac}, die op deze gelijkspanning is gesuperponeerd. De gelijkspanning gaat alleen naar de onderste ingang van de verschilversterker, het CR-netwerk spert immers gelijkspanningen.
De rimpelspanning gaat naar beide ingangen. De verschilversterker berekent het verschil tussen beide ingangsspanningen. De uitgangsspanning van de verschilversterker is dus gelijk aan:
$U_{uit} = (U_{dc} + U_{ac}) - U_{ac}$
$U_{uit} = U_{dc}$
De rimpelspanning is dus volledig verdwenen!
In een praktische schakeling kunt u de gelijkheid van de vier weerstanden instellen door het verdraaien van de loper van instelpotentiometer R6. Deze instelpotentiometer compenseert in eerste instantie de ongelijkheid tussen de weerstanden R2 tot en met R5+R6 en schakelt in tweede instantie de invloed van R1 op de weerstanden van de verschilversterker uit.

De top-detector

Inleiding
In de meeste gevallen zult u geïnteresseerd zijn in de gemiddelde waarde van een wisselspanning. Met de beschreven gelijkrichter met afvlakfilter kunt u deze waarde zeer

nauwkeurig meten. Er zijn echter ook toepassingen te verzinnen waarbij deze gemiddelde waarde niet interessant is, maar waarbij u wilt weten hoe groot de maximale waarde van een wisselspanningssignaal is. Deze maximale waarde noemt men de amplitude of de topwaarde van het signaal.
Een voorbeeld van een dergelijke toepassing is een VU-meter, waarmee ieder mengpaneel is uitgerust. Daar wilt u weten hoe groot de toppen van het op te nemen signaal zijn. Deze toppen bepalen immers of de eindversterker of het opnamesysteem wordt overstuurd. Is dat het geval, dan moet u het opnameniveau kleiner maken, waardoor de toppen van het signaal binnen het uitsturingsbereik van de versterker of het opnamesysteem vallen en er geen vervorming optreedt.
Voor dergelijke toepassingen heeft men top-detectoren ontwikkeld.

Het schema van een actieve top-detector
Het schema van de eenvoudige top-detector met een operationele versterker is gegeven in de onderstaande figuur. De werking wordt beschreven aan de hand van de rechter grafieken in deze figuur.
De ingangsspanning U_{in} wordt rechtstreeks aangeboden aan de niet-inverterende ingang van de operationele versterker. Tussen de uitgang en de inverterende ingang is een Si-diode D1 geschakeld. Dezelfde ingang gaat via een condensator C1 naar de massa. De uitgangsspanning van de schakeling wordt afgenomen van de inverterende ingang.



De praktische schakeling van een top-detector. (© 2023 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling zonder ingangssignaal
De schakeling koppelt een positieve uitgangssignaal van de op-amp via de geleidende diode terug naar de inverterende ingang. De schakeling werkt dan als buffer. Voor negatieve uitgangsspanningen gaat de diode sperren en is de op-amp uitgeschakeld.
Als u aan de ingang geen spanning aanlegt is niet te voorspellen hoe groot de spanning U_1 op de uitgang van de op-amp is. Het kan zijn dat de uitgang vastloopt tegen de negatieve voedingsspanning, maar het kan ook zijn dat er een kleine positieve spanning van 0,65 V op de uitgang ontstaat. Een en ander is volledig afhankelijk van de offset van de op-amp. Vandaar dat dit gebied gearceerd in de grafiek is weergegeven.
Hoe dan ook, duidelijk is dat de spanning op de inverterende ingang ook nul is.
Loopt immers de op-amp vast tegen de negatieve voedingsspanning, dan gaat de diode D1 sperren en staat de inverterende ingang op 0 V. Wordt echter de uitgang van de op-amp positief, dan gaat de diode geleiden en werkt de op-amp in gesloten lus. De schakeling zal

zich nu zo instellen dat de beide ingangsspanningen aan elkaar gelijk worden. De uitgang stelt zich in op ongeveer +0,65 V, de geleidingsspanning van de diode en ook nu is de spanning op de inverterende ingang nul.

Een positieve puls op de ingang
Stel nu dat u op de ingang van de schakeling op tijdstip t_1 een smalle positieve puls zet. De niet-inverterende ingang wordt positiever dan de inverterende ingang, het gevolg is dat de uitgang U_1 van de op-amp sterk positief wordt. De diode gaat geleiden, de condensator C1 wordt opgeladen tot de topwaarde van de positieve puls op de ingang. Dat laadproces gaat zeer snel. De condensator is immers via de geleidende diode (met een tamelijk lage eigen weerstand) verbonden met de uitgang van de op-amp, een uitgang die een zeer lage uitgangsweerstand heeft.
Op tijdstip t_2 is de condensator opgeladen tot de topwaarde van de positieve puls op de ingang. Maar de uitgang van de op-amp staat nog steeds maximaal positief ingesteld. De condensator wil dus verder opladen. Maar als de spanning op de inverterende ingang groter wordt dan de spanning op de niet-inverterende ingang zal de uitgangsspanning opeens van maximaal positief naar maximaal negatief gaan. De diode spert, de condensator kan niet verder opladen. Dit onderdeel gaat nu ontladen. Maar het is voldoende dat de spanning iets lager wordt of de situatie op de ingangen verandert. De niet-inverterende ingang wordt positiever dan de inverterende ingang, met als gevolg dat de uitgang van de op-amp weer maximaal positief wordt.

Conclusie
Zolang de ingangsspanning constant blijft zal de spanning over de condensator C1 met enige mV rond de waarde van de ingangsspanning schommelen en zal de uitgang van de op-amp voortdurend omklappen tussen maximaal positief en maximaal negatief.

Lading blijft stabiel
Op tijdstip t_3 valt de ingangspuls weg, de ingang gaat weer naar 0 V. De spanning op de inverterende ingang is nu uiteraard veel positiever dan de spanning op de niet-inverterende ingang. Het gevolg is dat de uitgang van de op-amp vastloopt tegen de negatieve voedingsspanning. De diode gaat sperren en de condensator C1 wordt losgekoppeld van de rest van de schakeling.
Omdat de inverterende ingang een zeer hoge weerstand heeft, zal de spanning over de condensator vrij lang stabiel op dezelfde waarde blijven. De lading kan alleen weglekken via de eigen lekweerstand van de condensator en via de ingangsweerstand van de over de condensator aangesloten volgende schakeling.

Algemeen besluit
Als u op de ingang van de top-detector een smalle positieve puls zet, dan zal de uitgang van de schakeling de maximale spanning van de puls overnemen. Maar deze spanning blijft vrij lang op de uitgang aanwezig, zelfs als de smalle puls verdwijnt.

Een toepassingsvoorbeeld
In de onderstaande figuur is een eenvoudige toepassing van een top-detector getekend, die echter in de praktijk zeer vaak wordt aangetroffen. De ingang van de top-detector wordt verbonden met een LF-signaal van bijvoorbeeld een microfoon. De uitgang gaat naar een LED VU-meter. Dergelijke meters werken traagheidsloos en zijn dus uitermate geschikt voor het aangeven van piekwaarden. De werking van de schakeling is duidelijk uit de grafieken af te lezen. De top-detector laadt zijn condensator op tot de waarde van de eerste positieve piek in het uitgangssignaal van de microfoon. Deze piekwaarde wordt op de meter aangegeven. Nadien zal de uitgangsspanning van de detector zeer langzaam dalen. Bij de eerstvolgende grotere piek laadt de condensator weer op tot deze piekspanning. De uitgangsspanning van de top-detector volgt dus het positieve piekverloop van het microfoonsignaal.

Een top-detector als VU-piekmeter in een audiosysteem.
(© 2023 Jos Verstraten)

Een uitgebreide schakeling
De besproken schakeling heeft als nadeel dat alleen positieve pieken worden herkend. Maar het kan natuurlijk ook voorkomen dat een signaal negatieve pieken heeft die veel groter zijn dan de positieve pieken. Om ook deze piekspanningen te kunnen detecteren heeft men een top detector ontwikkeld, die zowel op positieve als op negatieve pieken reageert. Het schema van een dergelijke schakeling is getekend in de onderstaande figuur.
De schakeling bestaat uit drie trappen. Rond OP2 en OP3 zijn positieve top-detectoren opgebouwd, die een gemeenschappelijke condensator C1 hebben. Over deze condensator zullen dus zowel de pieken ontstaat die gedetecteerd worden door OP2 en door OP3. Rond OP1 is een omkeerversterker opgebouwd. Deze heeft, door een geschikte keuze van de weerstanden R1 en R2, een versterking van -1. Het ingangssignaal wordt dus geïnverteerd aangeboden aan de ingang van de onderste top detector rond OP3 en niet geïnverteerd aan de ingang van de bovenste top detector OP2.
Deze laatste op-amp detecteert dus de positieve pieken in het signaal, de onderste de negatieve pieken. Deze worden immers door de omkeerversterker omgezet in positieve pieken. De condensator laadt zich op tot de maximale positieve of negatieve piekwaarde van het signaal. Maar let wel, de spanning over de condensator is uiteraard altijd positief!

Een verbeterde piek-detector die ook op negatieve pieken reageert.
(© 2023 Jos Verstraten)

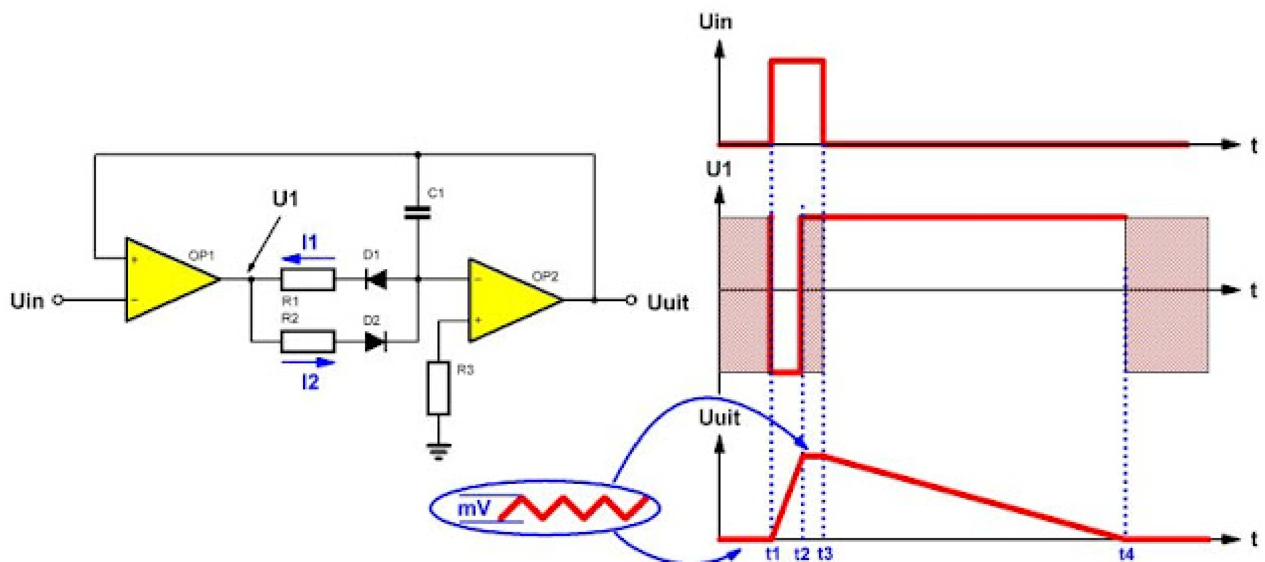
De precisie top-detector

Inleiding
De top-detector van de vorige figuren heeft als nadeel dat de werking van de schakeling wordt beïnvloed door de belastingsweerstand. De schakeling die de piekspanningen meet

staat immers over de condensator geschakeld en de ingangsweerstand van de meetschakeling vormt een ontlaadweerstand voor de condensator.
Nu kunt u natuurlijk dit probleem weer oplossen door de condensator af te sluiten met een bufferversterker. Maar daar is een tweede operationele versterker voor noodzakelijk. En als u dan tóch twee op-amp's nodig hebt kunt u beter gebruik maken van de in deze paragraaf beschreven zeer nauwkeurige top-detector.

Normen en voorschriften
Er is echter nog een tweede reden om de eenvoudige schakeling af te wijzen. Er bestaan bepaalde normen die voorschrijven hoe een top-detector moet reageren op een piek in een geluidssignaal. Volgens deze normen moet een top-detector binnen 4 ms reageren op een piekspanning op de ingang. Na het wegvallen van de piek moet de uitgangsspanning van de top-detector in 1 s terugvallen naar 0 V.
Deze tijden zijn met de eenvoudige basisschakelingen niet zo goed instelbaar. Vandaar dat men een betere schakeling heeft ontworpen, waarbij zowel de reactie-tijd als de terugval-tijd door middel van instelpotentiometers over een breed gebied instelbaar zijn.

De schakeling
De praktische schakeling van de precisie top-detector is getekend in de onderstaande figuur. De eerste operationele versterker OP1 is geschakeld als comparator. De tweede, OP2, is geschakeld als integrator. Tussen de inverterende ingang en de uitgang is een condensator C1 opgenomen. De inverterende ingang gaat bovendien via twee R/D-netwerkjes naar de uitgang van de comparator.



De praktische schakeling van de zeer nauwkeurige top-detector. (© 2023 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling
De werking wordt toegelicht aan de hand van de rechter grafieken in de figuur. Als aan de ingang van de schakeling geen spanning wordt gelegd, dan zal de uitgangsspanning op en neer gaan tussen enkele mV positief en enkele mV negatief. Dat verschijnsel wordt veroorzaakt door de offset-spanningen van de operationele versterkers. Stel dat de uitgangsspanning iets positief wordt. Deze kleine positieve spanning wordt teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang van de comparator. Het gevolg is dat de uitgang van OP1 vastloopt tegen de positieve voedingsspanning. Er gaat nu vanuit deze uitgang een stroom I_2 vloeien via de diode D2 en de weerstand R2. Door R1 kan geen stroom vloeien, de diode D1 gaat immers sperren. Deze stroom I_2 vloeit naar de inverterende ingang van de tweede operationele versterker.
Deze inverterende ingang ligt virtueel aan de massa, de stroom kan alleen afvloeien via de condensator C1 naar de uitgang. Het gevolg is dat deze condensator door een constante stroom I_2 wordt opgeladen. De spanning over de condensator gaat lineair stijgen. Maar de richting van de stroom is zo dat de linker plaat van de condensator positief wordt ten opzichte

van de rechter plaat. De linker plaat wordt echter op de massa gehouden door de werking van de tweede op-amp. Het gevolg is dat de uitgangsspanning negatief wordt. Deze negatieve spanning wordt echter teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang van OP1. Als de spanning onder de omklapdrempel van de comparator komt, klapt deze schakeling om en de uitgang wordt maximaal negatief. Er gaat nu een stroom I_1 vloeien via weerstand R1 en diode D1. Ook deze stroom kan alleen via de condensator C1 afvloeien. Omdat de stroom tegengesteld gericht is gaat de condensator nu met tegengestelde polariteit opladen.
De uitgangsspanning stijgt nu tot de comparator OP1 weer omklapt.
Dat geheel proces gaat vrij snel, zodat op de uitgang een kleine hoogfrequente driehoekspanning ontstaat met een amplitude van een paar mV.

Smalle positieve puls op de ingang
Stel nu dat u op tijdstip tl aan de ingang een smalle positieve puls aanbiedt. Deze positieve spanning komt terecht op de inverterende ingang van OP1. Het gevolg is dat de uitgang U_1 van deze op-amp onmiddellijk vastloopt tegen de negatieve voedingsspanning. De condensator C1 van de integrator wordt nu opgeladen door de stroom I_1. Het gevolg is dat de uitgangsspanning van de integrator lineair gaat stijgen naar de topwaarde van de ingangspuls. De snelheid waarmee de uitgang reageert is instelbaar door de waarde van R1 aan te passen. Als de uitgangsspanning gelijk wordt aan de topwaarde van de ingangsspanning zal de comparator OP1 weer omklappen. De condensator C1 wordt nu weer geladen door de tegengesteld vloeiende stroom I_2. De uitgangsspanning van de integrator gaat iets dalen. Maar het gevolg is dat de comparator onmiddellijk omslaat en de stroom I_2 weer vervangen wordt door de stroom I_1. De uitgangsspanning van de schakeling gaat nu dus met enige mV variëren rond de topwaarde van de ingangsspanning.

Het ingangssignaal valt weg
Op tijdstip t_3 valt de ingangspuls weg. De niet-inverterende ingang van de comparator OP1 is nu veel positiever dan de inverterende ingang. Het gevolg is dat de uitgang vastloopt tegen de positieve voedingsspanning. Er gaat nu weer een stroom I_1 vloeien naar de integrator, die tot gevolg heeft dat de condensator C1 gaat ontladen. De grootte van deze ontlaadstroom is instelbaar door de waarde van weerstand R2 aan te passen. Op tijdstip t_4 is de condensator volledig ontladen en gaat de uitgangsspanning weer rond de massa schommelen.

Conclusie
Deze schakeling voldoet aan de vooropgestelde eisen. De uitgang volgt met een instelbare vertraging de positieve pieken in het ingangssignaal en valt nadien met een eveneens instelbare vertraging terug naar 0 V. De twee genormeerde reactietijden van een goede top-detector zijn in te stellen door voor R1 en R2 instelpotentiometers in de schakeling op te nemen.